

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Piechoty pt. „Analiza metrologiczna zastosowania
przeływomierza ultradźwiękowego w rurociągu w miejscu za zasuwą”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza wpływu zaburzenia przepływu wywołanego przez zasuwę na dokładność pomiaru strumienia przepływu w miejscu za zasuwą za pomocą przeływomierza ultradźwiękowego.

Przeprowadzone zostały badania eksperymentalne i symulacje CFD pokazujące wpływ odległości przeływomierza ultradźwiękowego od źródła zaburzenia przepływu na błąd pomiaru strumienia przepływu.

Autor pokazał również, że istnieje optymalny układ głowic miernika ultradźwiękowego, dla którego błędy pomiaru strumienia przepływu w warunkach niestandardowych są najmniejsze.

Wykorzystując modelowanie CFD oraz anemometrię laserową wskazane zostały miejsca oraz kąty ustawienia głowic ultradźwiękowych na obwodzie rurociągu, w których błędy pomiaru strumienia przepływu w zadanej odległości od zasuwy są najmniejsze.

Badania eksperymentalne przeprowadzone przy użyciu przeływomierzy ultradźwiękowych oraz anemometru laserowego miały na celu wyznaczenie współczynnika korekcyjnego K kompensującego błąd pomiarowy spowodowany zaburzeniem wywołanym przez zasuwę nożową.

Część eksperymentalna pracy obejmowała pomiary przepływu za zasuwą nożową, w odległościach mniejszych od zasuwy niż określone w normach. Badania wykonano w zakresie odległości $3D - 15D$, tj. w odległości równej od 3 do 15 średnic rurociągu. Rejestrowaną wielkością była prędkość przepływu. W celach późniejszego wyznaczenia wartości współczynnika korekcyjnego K , równocześnie dokonywano pomiaru prędkości przepływu przed zasuwą nożową, w odległości zgodnej z określoną w normach. Pomiary przeprowadzone zostały dla dwóch różnych liczb Reynoldsa: 35 000 i 70 000.

Tematyka pracy jest aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.

Mgr inż. Piotr Piechota pokazał, że można rozszerzyć zakres pomiaru przepływu metodą ultradźwiękową z głowicami nakładanymi na rurociąg na zaburzony obszar przepływu przez wybranie odpowiedniego miejsca pomiaru na obwodzie rurociągu, tak aby błąd pomiaru strumienia przepływu był najmniejszy.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Piechoty o objętości 184 strony składa się z ośmiu rozdziałów, spisu ważniejszych oznaczeń oraz spisu literatury cytowanej zawierającego 142 pozycji literaturowych.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi krótki wstęp, w którym Kandydat opisuje metody pomiaru strumienia objętości płynu zaznaczając, że profil prędkości w przekroju poprzecznym

przewodu zależy od charakteru przepływu, tj. czy przepływ jest laminarny, czy też turbulentny. Rozkład prędkości w przekroju kanału dla przepływu turbulentnego zależy również od liczby Reynoldsa oraz chropowatości ścianek kanału. Autor podkreśla, że istnieje na rynku wiele przyrządów służących do pomiaru strumienia objętości płynu, między innymi rurki spiętrzające, kryzy miernicze, przepływomierze turbinowe, przepływomierze kolanowe, przepływomierze wirowe, przepływomierze Coriolisa, przepływomierze elektromagnetyczne oraz przepływomierze ultradźwiękowe. Wzorcowanie przepływomierzy cieczy wykonuje się zwykle metodą objętościową lub wagową. Wzorcowanie przepływomierzy gazu polega zwykle na wyznaczeniu charakterystyki pomiarowej danego przepływomierza przy użyciu przepływomierza referencyjnego. Autor podkreśla, że przyrządy do pomiaru strumienia objętości płynów bazują na najróżniejszych zjawiskach fizycznych. Do najbardziej popularnych przyrządów należą przepływomierze zwężkowe oraz rurki spiętrzające, które są bardzo dobrze przebadane i znormalizowane. W przypadku metod ultradźwiękowych nie ma odpowiednich norm dotyczących zasad przeprowadzania pomiarów i oceny ich dokładności. Przepływomierze ultradźwiękowe bazują na ultradźwiękowej dopplerowskiej metodzie echa, w której określany jest czas przejścia fali ultradźwiękowej odbijanej od cząstki przepływającej w rurze lub na metodzie polegającej na zmierzeniu czasu przejścia fali ultradźwiękowej od nadajnika do odbiornika zgodnie z kierunkiem ruchu płynu oraz w kierunku przeciwnym. Niezależnie od zasady działania i konstrukcji przyrządu pomiarowego są one kalibrowane na prostych odcinkach rur, gdy profil prędkości jest rozwinięty i nie zmienia się w kierunku przepływu płynu. Autor podkreśla zalety przepływomierzy ultradźwiękowych z głowicami nakładanymi (z ang. clamp-on), gdyż montowane są na zewnętrznej powierzchni rurociągu i nie zaburzają profilu prędkości przepływającego płynu. Zaznacza również, że w praktyce przepływomierze ultradźwiękowe są wrażliwe na zaburzenia przepływu, które mogą być wywołane przez zawory i zasuwy lub też osady na wewnętrznej powierzchni rurociągu. Z tego względu wymagane są proste odcinki rurociągu przed i za przeszkodą. W praktyce trudno jest zachować wymagane odcinki proste między przeszkodą i miejscem instalacji miernika. Kandydat proponuje wprowadzić korekcyjny współczynnik przepływu, zwany również współczynnikiem kształtu rozkładu prędkości, który uwzględni mniejszą odległość miernika od przeszkody niż jest to zalecane przez odpowiednie normy.

W rozdziale drugim przedstawiono tezę, cel, oraz zakres pracy doktorskiej. Sformułowana została następująca dwuczęściowa teza pracy obejmująca:

- Kompensację błędu pomiaru w warunkach niestandardowych;
Analiza modeli matematycznych rozkładów prędkości przepływu turbulentnego o zniekształconym profilu prędkości umożliwia wyznaczenie współczynnika korekcyjnego K dla przepływomierza ultradźwiękowego. Wyznaczenie współczynnika korekcyjnego K pozwala na kompensację błędu pomiaru w przypadku pomiarów wykonanych za elementem zaburzającym rozkład prędkości przepływu w postaci zasuwy nożowej.
- Identyfikację optymalnego punktu pomiarowego;
Istnieje miejsce na rurociągu, w odległości od zasuwy nożowej mniejszej niż określona w normach i zaleceniach, dla którego błąd pomiaru przepływomierzem ultradźwiękowym jest mniejszy niż błąd graniczny używanego przepływomierza.

Pomiar strumienia przepływu jest przedmiotem rozdziału trzeciego.

W pierwszym paragrafie tego rozdziału przedstawiony został podział przepływomierzy stosowany w praktyce. W paragrafie 3.2 omówiona została dokładniej metoda ultradźwiękowa pomiaru strumienia przepływu. W paragrafie 3.3 omówiono zagadnienia związane z wyborem miejsca pomiaru mierników ultradźwiękowych na rurociągach.

Autor rozprawy podkreśla, że gwarantowaną przez producenta dokładność pomiaru można osiągnąć przy spełnieniu określonych warunków takich jak całkowite wypełnienie przekroju rurociągu płynem, brak osadów, gładkość hydrauliczna ścian rurociągu, zachowanie prostych odcinków rurociągu przed i za miejscem montażu przepływomierza. Dokładniej omówione zostały wymagania producenta dotyczące zachowania prostych odcinków rurociągu przed i za rurociągiem.

Rozdział czwarty poświęcony jest matematycznemu modelowaniu przepływu w rurach.

W rozdziale 4.4 dokonano przeglądu wzorów dla przepływu laminarnego i burzliwego stosowanych w literaturze do wyznaczania rozkładu prędkości płynu w rurze w funkcji promienia. Zdefiniowano również współczynnik korekcyjny K^* do obliczania średniej prędkości płynu w przekroju poprzecznym rury v_c , na podstawie pomiaru prędkości płynu v_s wskazywanej przez miernik ultradźwiękowy. Prędkość v_s reprezentuje średnią prędkość płynu na drodze przejścia fali ultradźwiękowej, która jest obliczana jako wartość średnia prędkości na promieniu rury.

Profil prędkości aproksymowano w funkcji promienia i współrzędnej kątovej ϑ , w którym występują 3 współczynniki: n , k i m . Ponadto w rozkładach prędkości numer 4, 5, 6, 10, 11, 12 i 14 drugi wyraz w nawiasie kwadratowym we wzorze na rozkład prędkości pomnożony jest przez $\exp(-a\vartheta)$, gdzie a jest stałą.

Przedstawiono 14 rozkładów prędkości, w których wartości n wynoszą: 7, 9 lub 4. Współczynnik k wynosi 4; 0,5 lub 9. Również wartości stałych m i a są różne w poszczególnych modelach. Wzór (4.34) na współczynnik kształtu rozkładu prędkości K^* wyprowadzony został dla profilu prędkości numer 4, który określony jest wzorem (4.20). W tabeli 4.3 zestawiono wartości współczynnika K^* dla wszystkich analizowanych w pracy profili prędkości, przy czym wartość kąta ϑ zmieniała się 0 do 180 stopni.

Profile prędkości wyznaczone za pomocą 14 różnych funkcji aproksymujących przedstawiono w tabeli 4.4.

Opis stanowiska do ultradźwiękowego pomiaru prędkości oraz wyniki pomiarów przedstawiono w rozdziale piątym. Prędkość przepływu wyznaczano przed zasuwą za pomocą przepływomierza Microsonic Porta Flow 330 oraz za zasuwą za pomocą przepływomierza Endress+Hauser Prosonic Flow 93T. Dla każdej serii pomiarowej obliczono uśrednione wartości prędkości zmierzonej przed zasuwą v_p i za zasuwą v_z . W analogii do współczynnika kształtu rozkładu prędkości K^* wprowadzony został współczynnik K_{rz}^* charakteryzujący stopień zaburzenia przepływu, który zdefiniowany jest następująco

$$K_{rz}^* = \frac{v_p}{v_z} .$$

Analizę metrologiczną przepływomierza ultradźwiękowego w pomiarach za zasłoną nożową przeprowadzono w paragrafie 5.3.

Pomiary przeprowadzono przy 2 ustawieniach zasuw w pozycji zasłonięcia, 1/3 i 1/2 wysokości zasuw nożowej, przy których czynna powierzchnia przepływowa wynosiła odpowiednio 78,09% i 60,89%.

Wyniki pomiarów przedstawiono w rozdziale 6.

W paragrafach 6.1 i 6.2 przedstawione zostały wyniki pomiarów przy zadanym stopniu zamknięcia zasuw oraz przy zadanej liczbie Reynoldsa. Niepewność wyznaczania prędkości przepływu stanowi przedmiot paragrafu 6.3. Przedstawiona została zależność mierzonej prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych α oraz od odległości d przekroju pomiarowego od zasuw wyrażonej jako wielokrotność średnicy rurociągu D .

W paragrafie 6.1 przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń prędkości przy zamknięciu 1/3 wysokości zasuw nożowej przy liczbach Reynoldsa wynoszących $Re = 35\ 000$ i $Re = 70\ 000$ oraz przy dwóch ustawieniach głowic ultradźwiękowych typu Z i V.

W paragrafie 6.2 przeprowadzono podobne pomiary i obliczenia jak w paragrafie 6.1 ale przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej.

Z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń wynika, że wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od zasuw zmniejsza się rozrzut wartości K_{rz}^* w funkcji kąta α . W przypadku pomiaru wykonanego w pierwszym przekroju pomiarowym, w odległości 3D od zasuw nożowej, zbiór wartości K_{rz}^* stanowił zakres (0,909, 1,145) a dla przekroju 15D zakres (1,003, 1,024).

Wykorzystanie anemometrii laserowej (LDA) do identyfikacji rozkładu prędkości stanowi przedmiot rozdziału 7.

Przeprowadzone w rozdziale 7 pomiary prędkości w przekrojach odległych od zasuw o 4D, 7D, 10D i 15D pokazują, że w miarę oddalania się przekroju pomiarowego od zasuw następuje stabilizacja rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym rury. Jeżeli odległość przekroju pomiarowego od zasuw wynosi 15D, to wtedy profil prędkości w rurze jest rozwinięty i jest bardzo zbliżony dla analizowanych kątów α równych: 0° , 30° , 60° , 90° , 120° i 150° .

Podsumowanie rozprawy doktorskiej i wnioski końcowe przedstawione są w rozdziale 8.

2. Główne osiągnięcia naukowo-badawcze przedstawione w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Piechoty ma charakter obliczeniowo-eksperymentalny i wymagała przeprowadzenia pracochłonnych badań eksperymentalnych, oraz symulacji CFD.

Do oryginalnych osiągnięć mgr inż. Piotra Piechoty zaliczyłbym:

- Budowę stanowiska badawczego do pomiaru strumienia przepływu cieczy dla liczb Reynoldsa równych 35 000 lub 70 000. Na stanowisku zainstalowane były 2 przepływomierze, które służą do sprawdzenia wskazań dwóch przepływomierzy ultradźwiękowych: Microsonic PortaFlow 330 oraz Endress + Hauser Prosonic Flow 93T, za pomocą których odbywał się ciągły pomiar strumienia przepływu.
- Wyznaczenie przestrzennych rozkładów prędkości w kilkunastu przekrojach poprzecznych oddalonych od siebie o jedną średnicę nominalną. Analizowane przekroje

usytuowane były za zasuwą nożową. Rozkłady prędkości wyznaczone zostały za pomocą dopplerowskiego anemometru laserowego (LDA) oraz za pomocą symulacji CFD. Przeprowadzone pomiary i obliczenia potwierdziły dobrą dokładność modelowania CFD i jego przydatność do wyznaczania miejsc pomiaru strumienia objętości (za elementem zaburzającym przepływ) za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego, tak aby błąd pomiaru prędkości płynu był najmniejszy.

- Wykazanie, że do kompensacji błędu pomiarowego spowodowanego zniekształconym profilem prędkości (w porównaniu z rozwiniętym profilem prędkości) można zastosować współczynnik kształtu rozkładu prędkości K^* . Wartości współczynnika K^* można wyznaczyć z dużą dokładnością za pomocą modelowania CFD lub zastosowania anemometrii laserowej LDA do wyznaczenia rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym kanału.

3. Uwagi krytyczne

- Proszę porównać wzór (4.5) ze wzorem Prandtla (4.7) przyjmując, np. $r/R = 0,8$ oraz wykładniki $m = n = 7$ otrzymuje się bardzo różniące się od siebie wyniki. Ze wzoru (4.5) otrzymuje się: $v = 0,79 v_m$, natomiast ze wzoru Prandtla (4.7) otrzymuje się: $v = 0,0314 v_m$. Widać, że wzór (4.7) jest nieprawidłowy. Poprawny wzór Prandtla ma następującą postać

$$v = v_m \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}$$

- W rozdziale czwartym pominięto wyznaczanie profilu prędkości z układu równań zachowania masy i pędu dla przepływu turbulentnego. Rozwiązując ten układ równań można z dużą dokładnością wyznaczyć profil prędkości w przekroju rury. Szczegółowa procedura wyznaczania rozkładu prędkości w funkcji promienia przedstawiona jest w artykule „D. Taler, Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes, International Journal of Thermal Sciences, 105 (2016), 109-122” oraz w rozdziale 6 książki „D. Taler, Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers, Springer, Cham, Switzerland, 2019”. Prace te zostały jednak pominięte w przeglądzie literatury.
- W wielu miejscach w rozprawie zauważono drobne usterki gramatyczne.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Piechoty spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska ma duże znaczenie praktyczne. Wyniki uzyskane w pracy mogą być wykorzystane do podwyższenia dokładności pomiarów strumienia objętości za pomocą przepływomierzy ultradźwiękowych usytuowanych w niewielkiej odległości za zasuwą. Przypadki, gdy miernika przepływu nie można usytuować w dużej odległości za przeszkodą zgodnie z zaleceniami normy lub producenta miernika, występują bardzo często w pomiarach przemysłowych. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Piotra Piechoty do publicznej obrony swojej pracy. Proponuję również

wyróżnienie rozprawy doktorskiej za kompleksową analizę dokładności pomiaru strumienia przepływu przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych obejmującą badania eksperymentalne, w tym wyznaczenie profili prędkości metodą LDA, oraz za pomocą modelowania CFD.

David Jaleq